

논문 2008-45TC-3-4

인지 라디오와 기존 라디오 시스템의 공존을 위한 인지적인 빔포밍 기법

(A Cognitive Beamforming Scheme for Coexistence of Cognitive Radio
and Incumbent Radio Systems)

김 재 윤*, 김 현 욱*, 홍 민 기*, 신 요 안**

(Jaewoon Kim, Hyunwook Kim, Minki Hong, and Yoan Shin)

요 약

본 논문에서는 인지 라디오 (Cognitive Radio; CR)와 기존 라디오 (Incumbent Radio; IR) 시스템의 공존을 위한 인지적인 빔포밍 (Cognitive Beamforming) 기법을 제안한다. 제안된 인지적인 빔포밍 기법은 스펙트럼 사용에 있어서 IR 시스템의 우선권을 보장하기 위해 동일한 시간에 동일한 주파수를 점유하고 있는 IR 시스템에게 아무런 간섭 영향도 일으켜서는 안 된다. 이와 더불어, 제안된 기법은 위 조건을 만족시키는 범위 내에서 CR 사용자에게는 최대 채널 이득을 제공할 수 있어야 한다. 이러한 목적을 위해, 제안된 기법은 추가적인 무선자원 소모없이 CR 사용자에게는 데이터 전송을 가능하게 하면서 IR 사용자에게는 아무런 간섭 영향도 일으켜서는 안 된다. 모의실험 결과, 제안된 기법을 사용할 경우 CR 사용자는 IR 사용자에게 간섭 영향을 일으키지 않았으며, IR 시스템의 주파수 사용 우선권을 전혀 고려하지 않은 이상적인 빔포밍 시스템과 비교하여 CR 사용자의 비트오율 (Bit Error Rate) 성능이 약간 열화됨을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a cognitive beamforming scheme for coexistence of CR (Cognitive Radio) and IR (Incumbent Radio) systems. In order to maintain the priority of the IR in spectrum utilization, the proposed cognitive beamforming scheme needs to have the CR not cause any interference to the IR systems occupying the same frequency band at the same time. In addition, the proposed scheme has to provide maximum channel gain to the CRU (CR User) in a boundary of satisfying the former criterion. For this purpose, the proposed scheme does not cause any interference to the IRU (IR User), while the CRU is served without additional radio resource consumption. From simulation, we confirmed that when using the proposed scheme the CRU does not interfere with the IRU and there is little bit error rate performance degradation of the CRU as compared to that of the ideal beamforming system which does not consider the IR priority.

Keywords : Cognitive Radio, Cognitive Beamforming, Interference Cancellation, Multiple Antenna, OFDM

I. 서 론

인지 라디오 (Cognitive Radio; CR)는 인지 (Awareness), 학습 (Learning), 적응 (Adaptation) 등의

의미가 통합된 무선전송 기술로 정의된다^[1]. 즉, CR 시스템은 센서 등을 통해 주어진 채널 환경을 능동적으로 인지하고, 이때 인지된 환경 정보를 REM (Radio Environment Map)에 포함시켜, 이를 기반으로 학습 알고리즘 (Learning Algorithm)을 사용하여 CR 사용자에 주어진 환경에 가장 적합한 전송 파라미터 및 네트워크 등을 적응적으로 제공할 수 있는 기술을 의미한다^[1]. 이 CR 기술은 상황 인지적인 능력에 의해 한정된 주파수 자원을 시간, 공간 (Space), 지역 (Region)에 따라 재사용이 가능해지므로 주파수의 유희도를 인지하여

* 학생회원, ** 평생회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 본 논문은 한국학술진흥재단의 기초연구과제지원사업 (과제번호 KRF-2007-313-D00519)의 지원으로 이루어짐

접수일자: 2008년3월19일, 수정완료일: 2008년3월19일

주파수 자원 효율을 향상시킬 수 있으며, 학습 알고리즘과 적응적인 능력에 의해 주어진 환경에 능동적으로 대처가 가능하므로 CR 시스템을 사용하는 사용자에게 주어진 환경 상황에서 최대의 서비스 품질 (Quality of Service; QoS)을 보장할 수 있는 장점이 있어 최근 차세대 무선통신분야에서 각광받고 있다.

현재 CR 기술을 실제 시스템으로 개발 및 적용하기 위해 IEEE 802.22 WRAN (Wireless Regional Area Network) 표준화 기구가 창설되어 이를 중심으로 활발한 연구 개발을 진행 중에 있으며^[2], SDR (Software Defined Radio) 포럼^[3]에서는 CR Working Group를 통해 SDR 기술을 활용한 Cognitive Engine^[4]과 Policy Engine을 MAC (Medium Access Control) 계층에 포함시켜 계층간 상호 연동하는 CR 시스템에 관한 기반 연구가 진행되고 있다 또한, 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 차세대 무선통신 기술 분야에서도 Seamless하면서도 QoS가 보장된 통신 서비스를 제공하기 위해 유연하고 재구성 가능한 (Flexible and Reconfigurable) 통신 시스템 구조를 도출하는 것을 목표로 하고 있어, CR 기술의 활용 및 응용 가치는 더욱 높아졌다.

한편 CR의 연구 분야는 크게 스펙트럼 센싱, 자원관리, 무선적용전송 기술로 구분될 수 있다^[5]. 스펙트럼 센싱 기술은 기존 라디오 (Incumbent Radio; IR) 시스템에 대해 간섭 영향을 주지 않기 위해 시간, 공간, 지역적으로 유휴 주파수 대역을 인지할 수 있는 기술이고, 자원관리 기술은 CR 시스템을 위한 별도의 제어 채널이 존재하지 않는 상황에서 스펙트럼 센싱을 통해 인지된 주파수 유휴도를 기지국과 단말기간에 인식할 수 있도록 하는 프로토콜을 포함한 MAC 기술을 의미한다. 또한, 무선적용전송 기술은 스펙트럼 센싱을 통해 인지된 환경 정보와 별도의 채널상태정보 (Channel State Information)를 비롯한 간섭온도 (Interference Temperature)^[6] 등을 고려하여 주어진 환경에 가장 적합한 시스템 파라미터를 설정함으로써 최적의 데이터 전송을 가능하게 한다. 따라서 완성된 CR 시스템을 구성하기 위해서는 이들 세 분야에 대한 연구가 모두 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 현재까지의 CR에 대한 연구는 주로 스펙트럼 센싱과 자원관리 기술로 극히 제한적이고 초기적인 접근 단계의 수준에 있을 뿐만 아니라, 무선적용전송 기술에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 거의 연구가 진행되고 있지 않은 상황이다.

따라서 본 논문에서는 동일 주파수 대역을 동시에 점유하고 있는 CR 시스템과 IR 시스템의 공존을 위한 인

지적인 빔포밍 (Cognitive Beamforming) 기법을 제안한다. 이를 위해, 본 논문에서는 우선 Genie-aided CR 채널^[7~8]을 고려하여 시스템 모델을 제시하며, 여기에는 다중 안테나의 CR 송신기, 단일 안테나의 IR 송신기, 그리고 IR 사용자와 CR 사용자용 단일 안테나의 수신기가 각각 존재한다. 본 논문에서 제시한 시스템 모델에서 제안된 인지적인 빔포밍 기법은 IR 시스템의 우선권을 고려하여 IR 사용자에게는 간섭을 전혀 일으키지 않으면서, 추가적인 무선 자원의 소모없이 CR 사용자에게는 주어진 채널 환경에서 최적의 데이터 전송을 가능하게 한다. 본 논문은 다음과 같이 구성되었다. II장에서는 본 논문과 관련된 기존 연구들에 대해 간략히 소개한다. III장에서는 본 논문에서 제시하는 시스템 모델과 적용된 시스템 파라미터를 설명하고, IV장에서는 제안된 인지적인 빔포밍 기법에 대해 설명한다. 또한, V장에서는 모의실험 결과를 통해 제안된 기법의 성능을 분석하고, 마지막으로 VI장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련된 기존 연구들

1. Genie-aided CR 채널 모델

일반적으로 CR 시스템은 신뢰성있는 특정 스펙트럼 센싱 절차^[5]를 통해 인지된 유휴 스펙트럼 홀을 능동적으로 재사용하는 방안을 기본으로 한다. 이러한 기본적인 접근 원리를 통해서는 CR 시스템과 IR 시스템이 동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 사용하는 것은 불가능하다. 하지만, 특정 시간에 스펙트럼 홀이 존재하지 않는 경우에도 CR 사용자가 데이터 전송을 요구할 경우 기본적인 CR 접근 원리를 통해서는 CR 통신 서비스가 중단되는 것을 피할 수 없게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 N. Devroye 등은 [7~8]에서 동일한 시간에 동일 주파수를 통해 데이터를 전송할 수 있는 Genie-aided CR 채널 모델을 제시하였다. 그림 1에서는 두 개의 송신단과 두 개의 수신단이 존재하는 가장 간단한 예의 Genie-aided CR 채널 모델을 도시하고 있다. 이 Genie-aided CR 채널 모델은 두 개의 송신단 (IR 송신기 T_1 , CR 송신기 T_2)과 두 개의 수신단 (IR 송신기 R_1 , CR 송신기 R_2)으로 이루어진 간섭 채널로 정의되며, 여기서 T_2 는 전송하기로 예약된 메시지 T_1 을 Genie를 통해 미리 알 수 있다고 가정한다. 그때, [7~8]에서 소개된 것처럼 CR 송신기 T_2 는 적정의 신호처리를 통해 간섭 영향을 완화시킬 수 있게 된다. 한편, 일

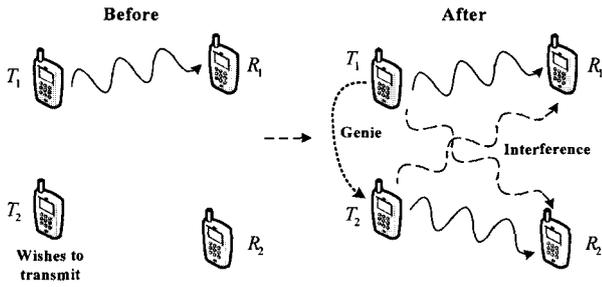


그림 1. 두 개의 송신단과 두 개의 수신단이 존재하는 Genie-aided CR 채널의 예
 Fig. 1. An example of the genie-aided CR channel with 2 senders and 2 receivers^[7,8].

반적인 간섭 채널과 이러한 Genie-aided CR 채널 모델의 차이점은 CR 송신기의 메시지 인지 (Knowledge)에 있다. 이 메시지 인지는 CR 시스템의 특성으로부터 가능해 진다. 즉, 만일 CR 송신기 T_2 가 IR 송신기 T_1 와 위치적으로 근접해 있다면, 그때 T_2 는 일부분의 전송 시간에서 T_1 에 의해 전송된 메시지를 얻게 된다^[7-8].

2. 일반적인 빔포밍 알고리즘

그림 2에서는 Grassmannian 빔포밍 기반의 폐쇄루프 (Closed-loop) MIMO-OFDM (Multiple Input Multiple Output-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템의 블록 다이어그램을 도시하고 있다. 이 시스템은 송수신단에서 약속된 V 개의 빔 가중치 벡터 (Beam Weight Vector)로 구성된 코드북 (Codebook)을 이용하는 Grassmannian 빔포밍을 사용한다. 주어진 채널 환경에서 코드북 세트 F 를 이용하여 최적의 빔 가중치 벡터 w 는 송신단에서 다음과 같이 선택된다.

$$w = \operatorname{argmax}_{x_i \in F} \| Hx_i \|^2 \tag{1}$$

여기서, H 와 x_i ($i = 0, \dots, V$)는 각각 채널 행렬과 코

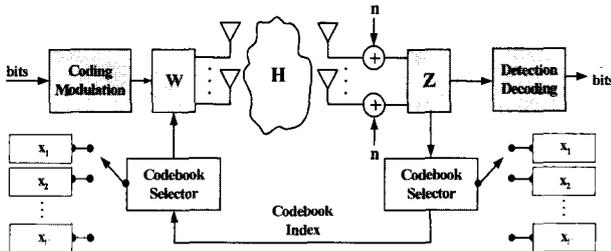


그림 2. Grassmannian 빔포밍 기반의 MIMO-OFDM 시스템의 블록 다이어그램
 Fig. 2. Block diagram of a MIMO-OFDM system based on the Grassmannian beamforming.

드북 세트 F 내에서의 빔 가중치 벡터를 나타낸다. Grassmannian 빔포밍에서 수신단은 식 (1)를 이용하여 최상의 빔 가중치 벡터를 선택하고 송신단으로 이 벡터의 인덱스 값을 제환 정보로써 전송한다. 즉, V 개의 벡터로 구성하는 코드북 세트로부터 선택되는 빔 가중치 벡터를 사용함에 따라 송신단으로 보내야 하는 제환 정보의 비트 수를 $\lceil \log_2 V \rceil$ 로 감소시킬 수 있다. 그러므로, Grassmannian 빔포밍을 사용하는 폐쇄루프 MIMO-OFDM 시스템은 채널 이득을 최대화하고 제환 정보량을 효과적으로 감소시킬 수 있으므로 높은 주파수 효율을 제공할 수 있다^[9].

III. 시스템 모델 및 파라미터

제안된 인지적인 빔포밍 기법을 제시하기 위해, 본 논문에서는 Genie-aided CR 채널^[7-8]을 고려하였다. 그림 3로부터 알 수 있듯이, 이 모델은 다수 안테나의 CR-BS (CR-Base Station)과 단일 안테나의 IR-BS, 그리고 CR 사용자와 IR 사용자를 위한 단일 안테나인 두 수신단으로 구성된다. 또한, CR 시스템과 IR 시스템은 동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 점유하고 있도록 설정된다.

여기서 실선은 데이터가 전송되는 채널을 나타내며, 점선은 간섭 신호 채널을 나타내며, 파선은 제환 채널을 나타낸다. 또한, CR-BS는 IR 사용자의 데이터 신호와 채널 정보를 Genie-aided 채널을 통해 알고 있다고 가정한다. IR 사용자는 CR-BS로부터 수신되는 간섭 신호의 채널 정보 h_{ci} 를 제환시키고, CR 사용자는 CR-BS로부터 수신되는 신호의 채널 정보 h_{cc} 와 IR 사용자의 IR-BS로부터 수신되는 간섭 신호의 채널 정보

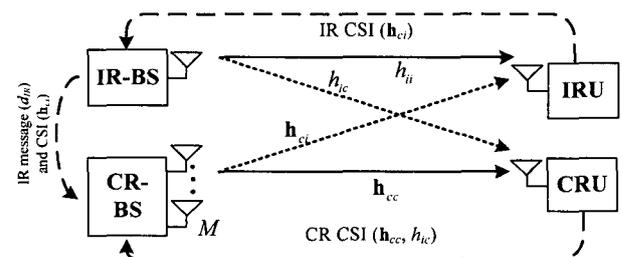


그림 3. 제안된 인지적인 빔포밍 기법을 위한 Genie-aided CR 채널 기반의 시스템 모델
 Fig. 3. System model based on the genie-aided CR channel for the proposed cognitive beamforming scheme.

표 1. IEEE 802.22 WRAN 시스템을 위한 OFDM 시스템 파라미터 세트

Table 1. An illustrative set of the OFDM system parameter for the IEEE 802.22 WRAN system^[10].

시스템 대역폭	7 MHz
부반송파 간격	3906 Hz
FFT 구간	256 μ sec
FFT 사이즈	2048
보호 부반송파의 수	368
사용되는 부반송파의 수	1680
데이터 부반송파의 수	1440
파일럿 부반송파의 수	240

h_{ic} 를 CR-BS로 제한시킨다. 이를 통해, CR-BS는 제한되는 모든 채널 정보를 미리 알 수 있게 된다. 또한, CR 사용자와 IR 사용자는 각각의 링크에서 동일한 전력의 데이터 신호와 간섭 신호가 수신된다고 가정하였다. 한편, 본 논문에서는 아래의 표 1에 정리된 IEEE 802.22 WRAN 시스템 파라미터^[10]를 사용하였다. 표 1은 하나의 7 MHz TV 대역을 점유하는 시스템을 위한 OFDM 시스템 파라미터들을 나타낸다.

IV. 제안된 인지적인 빔포밍 기법

동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 점유하고 있는 IR 사용자의 주파수 사용 우선권을 보장하기 위해, 제안된 인지적인 빔포밍 기법은 IR 사용자에게 어떠한 간섭 영향도 주지 않아야 하며, 이와 동시에 CR 사용자에게 최대의 채널 이득을 제공해야 한다. 앞서 3장에서 설명된 시스템 모델의 채널 상황에서 IR 사용자의 수신 신호 y_{IR} 와 CR 사용자의 수신 신호 y_{CR} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} y_{IR} \\ y_{CR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ii} & \mathbf{h}_{ci} \\ h_{ic} & \mathbf{h}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{IR} \\ \mathbf{w}_c d_{CR} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} h_{ii} d_{IR} + \mathbf{h}_{ci} \mathbf{w}_c d_{CR} \\ h_{ic} d_{IR} + \mathbf{h}_{cc} \mathbf{w}_c d_{CR} \end{bmatrix}$$

여기서, d_{CR} 와 d_{IR} 는 각각 해당 BS로부터 CR 사용자와 IR 사용자에게 전송되는 데이터 신호이고, M 은 CR-BS의 송신 안테나의 개수이다. h_{ii} , h_{ic} , $\mathbf{h}_{ci} = [h_{ci,1} \ h_{ci,2} \ \dots \ h_{ci,M}]$ 와 $\mathbf{h}_{cc} = [h_{cc,1} \ h_{cc,2} \ \dots \ h_{cc,M}]$ 는

각 해당 링크의 채널 전달 특성이다. 그리고 $\mathbf{w}_c = [w_{c,1} \ w_{c,2} \ \dots \ w_{c,M}]^T$ 는 CR-BS가 사용하는 빔가중치 벡터를 나타낸다. 여기서, IR 사용자에게 영향을 주지 않는 동시에 CR 사용자에게 최대의 채널 이득을 제공하기 위해 식 (3)와 (4)을 모두 만족시켜야 한다.

$$\mathbf{h}_{ci} \mathbf{w}_c = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{w}_c = \operatorname{argmax}_{\mathbf{x} \in X} \|\mathbf{h}_{cc} \mathbf{x}\|^2 \quad (4)$$

여기서 X 는 식 (3)를 만족시키는 빔가중치 벡터들의 집합이며, 이 조건을 만족시키기 위하여 식 (5)와 같이 첫 번째 빔가중치를 결정해야 한다.

$$w_{c,1} = -\frac{1}{h_{ci,1}} \sum_{m=2}^M h_{ci,m} w_{c,m} \quad (5)$$

이 때, IR 사용자의 송신 안테나에서 수신된 간섭 신호를 고려하지 않았을 경우 CR 사용자의 채널 이득은 다음 식 (6)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} G_{CR} &= \sum_{m=1}^M h_{cc,m} w_{c,m} \\ &= -\frac{h_{cc,1}}{h_{ci,1}} \sum_{m=2}^M h_{ci,m} w_{c,m} + \sum_{m=2}^M h_{cc,m} w_{c,m} \quad (6) \\ &= \sum_{m=2}^M \left(h_{cc,m} - h_{ci,m} \frac{h_{cc,1}}{h_{ci,1}} \right) w_{c,m} \end{aligned}$$

또한, IR 사용자로부터 수신된 간섭 신호의 영향을 고려한다면 CR 사용자의 수신 신호는 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 식 (8)로 다시 나타낼 수 있다.

$$y_{CR} = d_{IR} h_{ic} + G_{CR} d_{CR} \quad (7)$$

$$y_{CR} = d_{CR} w_{temp,1} h_{ic} + d_{CR} w_{c,2} h_{temp,2} + \dots + d_{CR} w_{c,M} h_{temp,M} \quad (8)$$

여기서 w_{temp} 와 $h_{temp,m}$ 는 각각 d_{IR}/d_{CR} 와 $h_{cc,m} - h_{ci,m} h_{cc,1}/h_{ci,1}$ ($m=2, \dots, M$)을 의미한다.

따라서 식 (8)은 이상적인 빔포밍의 수신 신호^[11]의 형태와 비슷하므로, 최대의 채널 이득을 얻기 위해 제안된 기법의 빔가중치는 이상적인 빔포밍 기법과 같이 방법으로 결정할 수 있으며, IR 사용자에게 간섭을 주지 않기 위해 첫 번째 빔가중치는 식 (5)와 같이 결정한다.

III. 모의실험 결과

동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 점유하고 있는 CR 시스템과 IR 시스템이 존재하는 환경에서 CR 시스템이 제안된 인지적인 빔포밍 기법을 사용할 경우 IR 시스템과 CR 시스템의 비트오율 (Bit Error Rate; BER) 성능에 대해 모의실험을 통해 분석하였다. 이를 위해, 본 논문에서는 2048개 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템을 고려하였고, IEEE 802.22 WRAN 다중경로 프로파일 A 채널 모델^[12]를 사용하였고, 여기에 Rayleigh 페이딩을 적용하였다. 표 2에서는 IEEE 802.22 표준 그룹에서 제시한 WRAN 참조 다중경로 프로파일 A를 정리하고 있다. Cyclic Prefix 구간은 FFT (Fast Fourier Transform) 구간의 1/4로 설정하였으며, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 방식을 적용하였다. 또한, 수신단에서 채널 추정은 완벽하게 이루어진다고 가정하였으며, CR 사용자를 위한 송신 안테나는 3개 수신 안테나는 1개로, IR 사용자의 송수신 안테나는 각각 1개로 구성되었다.

그림 4에서는 E_b/N_0 에 따른 IR 사용자의 주파수 사용 우선권을 고려하는 제안된 인지적인 빔포밍 기법이 적용된 CR 시스템과 IR 사용자의 주파수 사용 우선권을 전혀 고려하지 않는 이상적인 Beamforming 시스템의 BER 성능을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 제안된 기법 ("Proposed")은 동일한 수의 송신 안테나를 사용하면서 IR 사용자의 우선권을 전혀 고려하지 않는 이상적인 빔포밍 방식 ("Ideal 3Tx-1Rx")보다 BER 성능이 약 2 dB 가량만 열화됨을 확인할 수 있다. 그리고 2개의 송신 안테나를 사용하는 이상적인 빔포밍 방식 ("Ideal 2Tx-1Rx")보다는 약 4 dB 가량 우수한 성능을 나타냈다. 제안된 기법의 이러한 성능 추이는 IR 사용자에게 미치게 되는 간섭을 고려하기 위해 제안된

표 2. IEEE 802.22 WRAN 참조 채널 모델의 다중경로 프로파일 A

Table 2. Multipath profile A of the IEEE 802.22 WRAN reference channel model^[12].

	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Excess Delay [μ sec]	0	3	8	11	13	21
Relative Amplitude [dB]	0	-7	-15	-22	-24	-19
Doppler Frequency [Hz]	0	0.10	2.5	0.13	0.17	0.37

기법이 적용된 송신 안테나들에게는 일정 정도의 제약이 있으므로 상당히 우수한 성능이라고 할 수 있다. 또한, 그림 5에서는 제안된 기법을 사용하는 CR 사용자가 존재할 경우와 존재하지 않을 경우에 대한 IR 사용자의 BER 성능을 나타내고 있다. 이를 통해 알 수 있듯이, 제안된 기법을 사용하는 CR 사용자가 IR 사용자에게 간섭 영향을 전혀 미치지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 제안된 기법은 동일한 시간에 동일한 주파수 대역을 점유하고 있는 환경에서 CR 시스템이 제안된 인지적인 빔포밍 기법을 사용할 경우 IR 사용자에게는 전혀 간섭 영향을 미치지 않고, CR 사용자에게는 최대의 채널 이득을 제공할 수 있음을 모의실험을 통해 확인할 수 있었다.

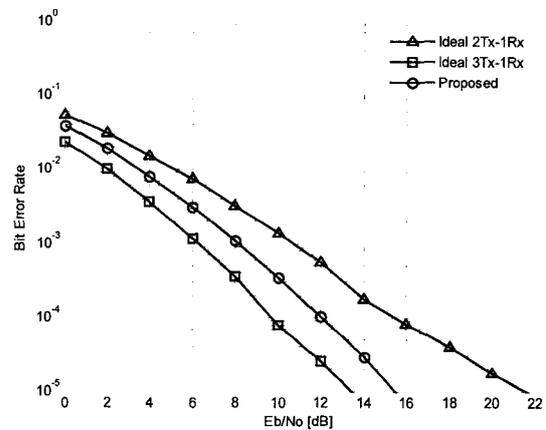


그림 4. 제안된 기법과 이상적인 빔포밍에 따른 CR 사용자의 BER 성능

Fig. 4. BER performance of the CR user by the proposed scheme and the ideal beamforming.

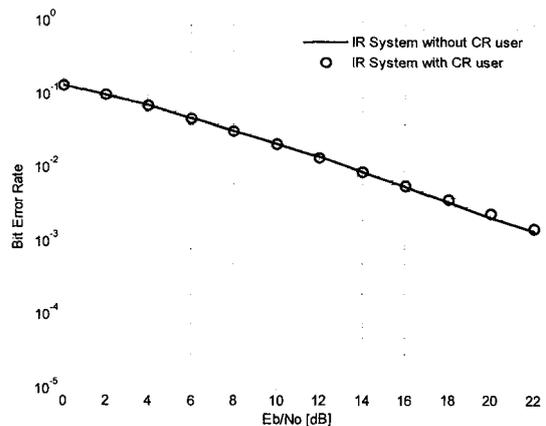


그림 5. 제안된 CR 시스템의 유무에 따른 IR 시스템의 BER 성능 비교

Fig. 5. Comparison of BER performance of the IR system with or without the proposed CR system.

IV. 결 론

본 논문에서는 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위해 CR 사용자와 IR 사용자가 동일한 시간에 동일한 주파수 대역에 공존하도록 할 수 있는 인지적인 빔포밍 기법을 제안하였다. 이를 위해, Genie-aided CR 채널 기반의 시스템 모델을 제시하였으며, 수식 전개를 통해 IR 사용자에게는 아무런 간섭 영향도 주지 않는 최우선적인 조건을 반드시 만족하면서, 이 조건 범위 내에서 CR 사용자에게는 최대의 채널 이득을 제공할 수 있는 빔 가중치 벡터를 결정하는 방안을 유도하였다. 이는 모의실험 결과, 제안된 기법은 IR 사용자에게 간섭을 전혀 일으키지 않고, 동일한 수의 송신 안테나를 사용하면서 IR 사용자의 우선권을 전혀 고려하지 않는 이상적인 빔포밍 방식과 비교하면 약 2 dB 정도 BER 성능 열화가 되지만, 2개의 송신 안테나를 사용하면서 IR 사용자의 우선권을 전혀 고려하지 않는 이상적인 빔포밍 방식과 비교할 경우 약 4 dB 가량 BER 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. Fette, *Cognitive Radio Technology*, Ch. 4, Newnes, 2006.
- [2] <http://www.ieee802.org/22/>
- [3] <http://www.sdrforum.org/>
- [4] C. Rieser, T. Rondeau, and T. Gallagher, "Cognitive radio testbed: Further details and testing of a distributed genetic algorithm based cognitive engine for programmable radios," *Proc. IEEE MILCOM 2004*, vol. 3, pp. 1437-1443, Monterey, USA, Nov. 2004.
- [5] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE Jour. Selected Areas in Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [6] T. Clancy and W. Arbaugh, "Measuring interference temperature," *Proc. Virginia Tech MPRG Symp. Wireless Personal Commun. (MPRG 2006)*, June 2006.
- [7] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Limits on communications in a cognitive radio channel," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 6, pp. 44-49, June 2006.
- [8] N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, "Achievable rates in cognitive radio channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 5, pp. 1813-1827, May 2006.
- [9] D. Love, R. Heath, Jr., and T. Strohmer, "Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [10] IEEE 802.22 Draft Standard, "IEEE P802.22TM /D0.3.7 draft standard for wireless regional area networks Part 22," July 2007.
- [11] C. Kim, S. Choi, and Y. Cho, "Adaptive beamforming for an OFDM system," *Proc. IEEE VTC 1999-Spring*, vol. 1, pp. 484-488, Houston, USA, May 1999.
- [12] "WRAN channel modeling," IEEE802.22-05/0055r7, Aug. 2005.

저 자 소 개



김 재 운(학생회원)
 2004년 숭실대학교
 정보통신전자공학부 학사.
 2006년 숭실대학교
 정보통신공학과 석사.
 2006년~현재 숭실대학교
 정보통신공학과
 박사과정 재학중.

<주관심분야 : UWB 전송 시스템, OFDM 시스템, Cognitive Radio, MIMO-OFDM>



홍 민 기(학생회원)
 2006년 숭실대학교
 정보통신전자공학부 학사.
 2006년 ~현재 숭실대학교
 정보통신공학과
 석사과정 재학중.

<주관심분야 : OFDM 시스템, Cognitive Radio>



김 현 욱(학생회원)
 2006년 숭실대학교
 정보통신전자공학부 학사.
 2008년 숭실대학교
 정보통신공학과 석사.

<주관심분야 : OFDM 시스템, Cognitive Radio>



신 요 안(정회원)
 1987년 서울대학교
 전자공학과 학사.
 1989년 서울대학교
 전자공학과 석사.
 1992년 University of Texas at
 Austin 전기및컴퓨터
 공학과 박사.

1992년~1994년 오스틴 소재 MCC (Micro-electronics & Computer Technology Corp.) 연구콘소시엄 Member of Technical Staff

1994년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 정교수

<주관심분야 : CDMA 및 OFDM 모델, UWB 전송 시스템, MIMO 시공간 신호처리, Cognitive Radio>